Notice d'utilisation des éléments TUYAU_*

Résumé :

Ce document est une notice d'utilisation pour les modélisations TUYAU_3M et TUYAU_6M.

Les éléments finis TUYAU_3M et TUYAU_6M correspondent à des éléments linéiques de tuyauterie droite ou courbe. La cinématique des éléments TUYAU combine à la fois une cinématique de poutre, qui décrit le mouvement d'ensemble de la ligne de tuyauterie, et une cinématique de coque, qui apporte la description du gonflement, de l'ovalisation et du gauchissement de la section transversale.

Ces modélisations sont utilisables pour des problèmes de tuyauteries tridimensionnelles relativement épaisses, en analyse mécanique linéaire ou non linéaire et en petits déplacements.

Table des matières

1 Introduction

Les éléments finis TUYAU_3M et TUYAU_6M correspondent à des éléments linéiques de tuyauterie droite ou courbe. Ils s'appuient sur une cinématique de poutre de Timoshenko pour les déplacements et les rotations de la fibre moyenne et sur une cinématique de coque pour les déformations de la section transverse (ovalisation, gauchissement, gonflement). Ces déformations transverses sont décomposées en séries de Fourier. La modélisation TUYAU_3M prend en compte 3 modes au maximum, tandis que la modélisation TUYAU_6M prend en compte 6 modes de Fourier.

Ces modélisations sont utilisables pour des problèmes de tuyauteries tridimensionnelles relativement épaisses, uniquement en analyse mécanique linéaire ou non linéaire et en petits déplacements. Actuellement, aucun calcul de thermique ou d'acoustique n'est possible.

Ce document présente les possibilités de la modélisation TUYAU disponible dans la version 6 du *Code_Aster*. On présente dans un premier temps les possibilités de ce type de modélisation, ensuite on rappelle brièvement la formulation des éléments finis et leurs différences avec les modélisations poutre. On donne également la liste des options disponibles pour chacun des éléments. On termine par la présentation de quelques cas-tests académiques et enfin on donne quelques conseils d'utilisation.

Les éléments de tuyaux droits ou courbes sont regroupés sous les modélisations TUYAU_3M et TUYAU_6M. Les options de calculs sont définies dans ce document. Les possibilités actuelles de ces éléments tuyaux sont les suivantes :

- lignes de tuyauterie droites ou courbes,
- élément linéique à 3 nœuds (SEG3) ou à 4 nœuds (SEG4),
- tuyau relativement épais : $e/R<0.2$ où e représente l'épaisseur et R le rayon de la section transverse,
- pression interne, flexions planes et anti-planes, torsion et extension,
- petits déplacements,
- comportement élasto-plastique en contraintes planes, ou non linéaire incrémental quelconque,
- la section transverse peut se déformer par :
  - gonflement dû à la pression interne ou à l'effet de Poisson,
  - ovalisation due à la flexion,
  - gauchissement dû aux flexions combinées dans le plan et hors plan.

Comparée à la modélisation TUYAU_3M, la modélisation TUYAU_6M permet une meilleure approximation du comportement de la section transversale dans le cas où celle-ci se déforme suivant un mode élevé, par exemple dans le cas de tubes minces où le rapport épaisseur sur rayon de la section transversale est <0.1 , et dans le cas de la plasticité.

La modélisation TUYAU_3M possède 21 degrés de liberté par nœud (6 degrés de liberté de poutre et 15 degrés de liberté de coque), tandis que la modélisation TUYAU_6M possède 39 degrés de liberté par nœud (6 degrés de liberté de poutre et 33 degrés de liberté de coque).

Pour la modélisation TUYAU_3M, on peut utiliser des mailles SEG3 et SEG4.

2 Capacités de modélisation

2.1 Rappel de la formulation

2.1.1 Géométrie des éléments tuyaux

Nous rappelons ici les méthodes et les modélisations mises en œuvre pour les éléments tuyaux et qui sont présentées dans le document de référence [R3.08.06].

Pour les éléments tuyaux on définit une fibre moyenne, droite ou courbe (x définit la coordonnée curviligne) et une section creuse de type circulaire. Cette section doit être petite par rapport à la longueur de la tuyauterie. La figure [Figure 2.1.1-a] illustre les deux différentes configurations. Un repère local $oxyz$ est associé à la fibre moyenne.

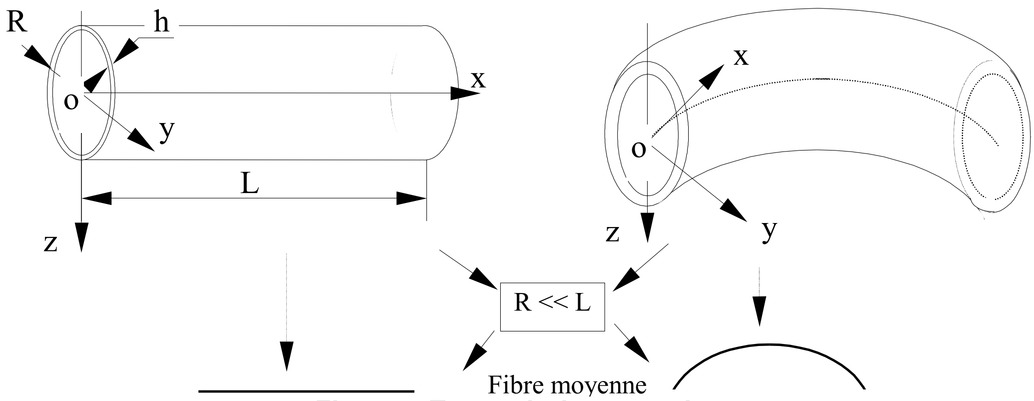


Figure : Tuyau droit ou courbe.

2.1.2 Formulation des éléments tuyaux

La cinématique du tuyau [Figure 2.1.1-a] se compose d'une cinématique de coque qui apporte la description de l'ovalisation, du gonflement et du gauchissement, et d'une cinématique de poutre qui décrit le mouvement d'ensemble de la ligne de tuyauterie. Le déplacement U [Figure 2.1.2-b] d'un point matériel du tuyau se compose d'une partie macroscopique poutre (U^P) et d'une partie supplémentaire locale coque (U^S) : $U=U^P+U^S$

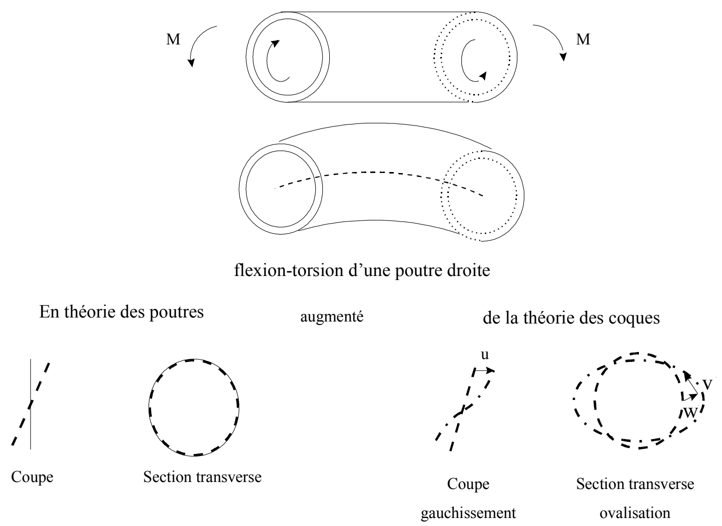


Figure : Décomposition du déplacement en champs de poutre et de coque.

La formulation des éléments repose sur :

- La **théorie des poutres** pour la cinématique de la fibre moyenne. Si on fait l'hypothèse complète de la théorie des poutres : les sections droites associées aux déplacements de poutre (U^P), qui sont perpendiculaires à la **fibre moyenne** de référence [Figure 2.1.2-b] restent perpendiculaires à

la fibre moyenne après déformation. La section droite ne se déforme pas. Ceci sera vrai en moyenne dans l'élément `TUYAU`. On n'utilise la théorie des poutres que pour décrire le mouvement de la fibre moyenne : la fibre moyenne du tuyau est équivalente à la fibre moyenne d'une poutre. Cette cinématique permet de décrire le mouvement d'ensemble de la ligne de tuyauterie.

- La **théorie des coques** pour décrire la déformation des sections transverse autour de la fibre moyenne. Cinématique des sections transverses : les sections droites qui sont perpendiculaires à la **surface moyenne** de référence restent droites. Les points matériels situés sur la normale à la surface moyenne non déformée restent sur une droite dans la configuration déformée. La formulation utilisée est une formulation de type LOVE_KIRCHHOFF sans cisaillement transverse pour la description du comportement des sections transverses. L'épaisseur de la coque reste constante. La surface moyenne ω du tuyau, située à mi-épaisseur, est équivalente à la surface moyenne d'une coque. Cette cinématique de coque apporte la description du gonflement, de l'ovalisation et du gauchissement de la section transversale.

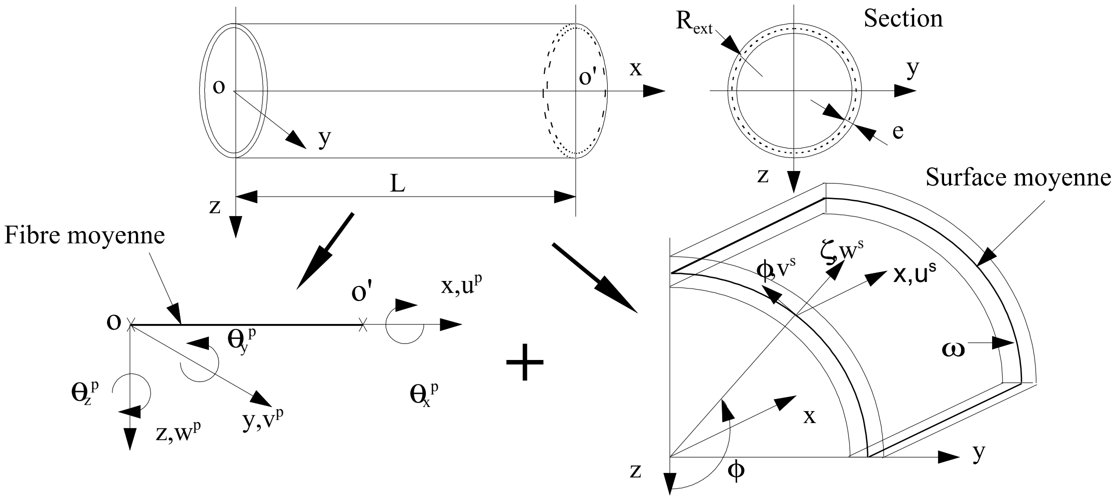


Figure : Fibre et surface moyenne dans le cas d'un tuyau droit .

Les déplacements supplémentaires (U^s) de la surface du tuyau sont approximés par une série de Fourier jusqu'à l'ordre M ($M=3$ pour la modélisation `TUYAU_3M` et $M=6$ pour la modélisation `TUYAU_6M`).

$$u^s(x,\Phi)=\sum_{m=2}^{M} u_m^i(x)\cos m\Phi+\sum_{m=2}^{M} u_m^0(x)\sin m\Phi$$

$$v^s(x,\Phi)=w_1^i(x)\sin\Phi+\sum_{m=2}^{M} v_m^i(x)\sin m\Phi-w_1^0(x)\cos\Phi+\sum_{m=2}^{M} v_m^0(x)\cos m\Phi$$

$$w^s(x,\Phi)=w^0+\sum_{m=2}^{M} w_m^i(x)\cos m\Phi+\sum_{m=2}^{M} w_m^0(x)\sin m\Phi$$

Où u^s : représente le déplacement axial de la surface moyenne dans le repère local $x\,\Phi\,\zeta$
v^s : représente le déplacement ortho-radial de la surface moyenne dans le repère local $x\,\Phi\,\zeta$
w^s : représente le déplacement radial de la surface moyenne dans le repère local $x\,\Phi\,\zeta$
w^0 : représente le gonflement

Ces éléments font donc intervenir localement :

- 6 variables cinématiques pour la formulation poutre : les déplacements u^p , v^p et w^p suivant la fibre de référence et les rotations autour des axes locaux,
- 3 variables cinématiques pour la formulation coque : les déplacements supplémentaires u^s , v^s et w^s dans le repère de la surface moyenne,

- 4 contraintes dans l'épaisseur du tuyau notées $SIXX$ (sxx), $SIYY$ (sff), $SIXY$ (sxf), et $SIXZ$ (sxz). La contrainte $SIZZ$ (szz) est nulle (hypothèse de contraintes planes). Les contraintes de cisaillement transverses sont nulles (hypothèse de Love Kirchoff),
- 4 déformations dans l'épaisseur du tuyau notées $EPXX$ (exx), $EPYY$ (eff), $EPXY$ (exf), et $EPXZ$ (sxz). La déformation $EPZZ$ (ezz) est nulle pour la partie poutre.

Remarque importante :

> *La cinématique de poutre est basée sur l'hypothèse de Timoshenko [R3.08.03]. L'élément tuyau n'est pas «exact» aux nœuds pour des chargements ou torseurs concentrés aux extrémités, il faut mailler avec plusieurs éléments pour obtenir des résultats corrects.*
> *Suivant la fibre moyenne, ces éléments sont de type isoparamétriques. Il en résulte que les déplacements varient comme des polynômes d'ordre 2 suivant X pour les éléments à 3 nœuds et d'ordre 3 pour 4 nœuds.*

2.2 Comparaison à d'autres éléments

2.2.1 Les différences entre les éléments tuyaux

Les éléments tuyaux `TUYAU_3M` et `TUYAU_6M` sont des éléments linéiques :

- `TUYAU_3M` à trois ou quatre nœuds.
- `TUYAU_6M` à quatre nœuds.

Ces éléments se différencient uniquement au niveau de l'approximation du champ de déplacement supplémentaire `COQUE`, qui est faite par une décomposition en série de Fourier :

- `TUYAU_3M` jusqu'à l'ordre 3.
- `TUYAU_6M` jusqu'à l'ordre 6.

Par conséquent le nombre de degrés de liberté est différent :

- `TUYAU_3M` 21 par nœud (6 degrés de liberté de poutre et 15 degrés de liberté de coque)
- `TUYAU_6M` 39 par nœud (6 degrés de liberté de poutre et 33 degrés de liberté de coque)

Comparée à la modélisation `TUYAU_3M`, la modélisation `TUYAU_6M` permet une meilleure approximation du comportement de la section transversale dans le cas où celle-ci se déforme suivant un mode élevé, par exemple dans le cas de tubes minces où le rapport épaisseur sur rayon de la section transversale est <0.1 , et dans certains cas en plasticité.

2.2.2 Les différences entre les éléments tuyaux et les éléments poutres

A l'instar des éléments finis `TUYAU`, les éléments finis `POUTRE` font également partie de la classe des éléments finis linéiques. On compare dans cette partie les formulations et les chargements applicables pour ces deux classes d'éléments.

Au niveau de la formulation :

- **Élément `POUTRE` :**
  La formulation est basée sur une résolution exacte des équations du modèle continu effectué pour chaque élément du maillage. Plusieurs types d'éléments de poutre sont disponibles :
  - `POU_D_E` : le cisaillement transverse est négligé, ainsi que l'inertie de rotation. Cette hypothèse est vérifiée pour de forts élancements (Hypothèse d'Euler),
  - `POU_D_T`, `POU_C_T` : le cisaillement transverse et tous les termes d'inertie sont pris en compte. Cette hypothèse est à utiliser pour des élancements faibles (Hypothèse de Timoshenko).

  Ces éléments utilisent des mailles de type `SEG2` avec 6 degrés de liberté par nœuds, 3 déplacements et trois rotations. La formulation de ces éléments est présentée dans le document de référence [R3.08.01]. La section est constante, le seul comportement possible des sections transverses est la translation et la rotation pour l'ensemble des points de la section. La section peut-être de forme quelconque constante ou variable sur la longueur.

- **Elément `TUYAU` :**
  La formulation combine à la fois une formulation poutre basée sur l'hypothèse de Timoshenko et une formulation coque basée sur l'hypothèse de Love_Kirchhoff permettant de modéliser les phénomènes de gonflement, d'ovalisation et de gauchissement. La section creuse, de forme

circulaire, est constante sur toute la longueur de l'élément. L’élément n’est pas « exact » aux nœuds pour des chargements ou torseurs concentrés aux extrémités, il faut donc mailler avec plusieurs éléments pour obtenir des résultats corrects.
Ces éléments utilisent des mailles de type SEG3 ou SEG4 avec, pour la cinématique de poutre 6 degrés de liberté par nœuds, 3 déplacements et trois rotations, et pour la cinématique de coque, 15 ou 33 degrés de liberté de typer déplacement.

Au niveau des **chargements applicables** :

- **Élément POUTRE :**
  Les chargements possibles sont les chargements d'extension, de flexion et de torsion. Le chargement de pression interne pour les sections creuses n’existe pas (la section est indéformable).
- **Élément TUYAU :**
  L’élément TUYAU admet les chargements classiques de poutre ainsi que l’application d’une pression interne.

3 Description du jeux de commandes

3.1 Affectation d'une modélisation et discrétisation spatiale

Dans cette partie, on décrit le choix et l'affectation d'une des deux modélisations TUYAU ainsi que les degrés de liberté et les mailles associées. La plupart des informations décrites sont extraites de la documentation d'utilisation [U3.11.06] : Modélisations TUYAU_3M et TUYAU_6M.

3.1.1 Degrés de libertés

Les degrés de liberté sont, en chaque nœud de la maille support :
- les six composantes de déplacement de la fibre moyenne (trois translations et trois rotations),
- trois degrés de liberté correspondant aux modes 0 et 1,
- pour chaque mode de Fourier, 6 degrés de liberté (U correspond au gauchissement, V et W à l'ovalisation : V au déplacement orthoradial, W au déplacement radial, I signifie "in plane" et O signifie "out of plane").

Élément	Degrés de liberté à chaque nœud sommet						Remarques
TUYAU_3M	DX	DY	DZ				Valeur de la composante de déplacement en translation imposée sur les nœuds spécifiés
	DRX	DRY	DRZ				Valeur de la composante de déplacement en rotation imposée sur les nœuds spécifiés
	W0	WI1	WO1				Degré de liberté de gonflement et mode 1 sur W
	UI2	VI2	WI2	UO2	VO2	WO2	Degrés de liberté liés au mode 2
	UI3	VI3	WI3	UO3	VO3	WO3	Degrés de liberté liés au mode 3
TUYAU_6M	DX	DY	DZ				Valeur de la composante de déplacement en translation imposée
	DRX	DRY	DRZ				Valeur de la composante de déplacement en rotation imposée
	W0	WI1	WO1				degrés de liberté de gonflement et mode 1 sur W
	UI2	VI2	WI2	UO2	VO2	WO2	degrés de liberté liés au mode 2
	UI3	VI3	WI3	UO3	VO3	WO3	degrés de liberté liés au mode 3
	UI4	VI4	WI4	UO4	VO4	WO4	degrés de liberté liés au mode 4
	UI5	VI5	WI5	UO5	VO5	WO5	degrés de liberté liés au mode 5
	UI6	VI6	WI6	UO6	VO6	WO6	degrés de liberté liés au mode 6

3.1.2 Maille support des matrices de rigidité

Les mailles support des éléments finis, en formulation déplacement, sont des segments à 3 ou 4 nœuds.

Modélisation	Maille	Élément fini	Remarques
TUYAU_3M	SEG3	METUSEG3	Maille linéique
	SEG4	MET3SEG4	Maille linéique
TUYAU_6M	SEG3	MET6SEG3	Maille linéique

Les mailles SEG4, qui ont des fonctions de formes cubiques, ont été développées pour résoudre un problème simple de poutre en flexion. Pour cet exemple simple, la solution exacte est obtenue à l'aide d'un seul élément à maille SEG4.
Pour des problèmes plus complexes, l'expérience montre que l'on peut mailler beaucoup plus grossièrement avec des mailles SEG4. Par exemple il faut une quinzaine d'éléments SEG3 pour obtenir une solution correcte pour un coude en flexion alors qu'il en faut la moitié avec des éléments SEG4.

Remarque :

> *On peut utiliser l'opérateur `MODI_MAILLAGE` pour construire des mailles `SEG4` à partir de mailles `SEG3` .*

3.1.3 Maille support des chargements

Tous les chargements applicables aux éléments utilisés sont traités par discrétisation directe sur la maille support de l'élément en formulation déplacement. La pression et les autres forces linéiques ainsi que la pesanteur sont des exemples de chargements s'appliquant directement sur l'élément. Aucune maille spéciale de chargement n'est donc nécessaire.

3.1.4 Modèle : AFFE_MODELE

L'affectation de la modélisation passe par l'opérateur AFFE_MODELE [U4.41.01]. On rappelle que seul le phénomène mécanique est disponible avec l'élément TUYAU.

AFFE_MODELE		TUYAU_3M TUYAU_6M	Remarques
AFFE		•	
PHENOMENE	'MECANIQUE'	•	
MODELISATION	'TUYAU_3M'	•	
MODELISATION	'TUYAU_6M'	•	

Au niveau du choix de la modélisation TUYAU, on peut noter que l'utilisation d'une décomposition en série de Fourier à l'ordre 6 (élément TUYAU_6M) améliore l'approximation du comportement de la section transversale dans le cas où celle-ci se déforme suivant un mode élevé, par exemple dans le cas de tubes minces où le rapport épaisseur sur rayon de la section transversale est <0.1 , et dans le cas de la plasticité

3.2 Caractéristiques élémentaires : AFFE_CARA_ELEM

Dans cette partie, les opérandes caractéristiques de l'élément tuyau sont décrites. La documentation d'utilisation de l'opérateur AFFE_CARA_ELEM est [U4.42.01].

AFFE_CARA_ELEM		TUYAU_3M TUYAU_6M	Remarques
POUTRE		•	
SECTION :	'CERCLE'	•	
% section	constante	•	
% section	Variable	•	
	MODI_METRIQUE	•	
TUYAU_NCOU	tncouch	•	
TUYAU_NSEC	tnsec	•	
ORIENTATION	'GENE_TUYAU'	•	Définition d'une génératrice. Par défaut, une génératrice est créée
	PRECISION	•	
	CRITERE	•	

Les caractéristiques qu'il est possible d'affecter sur les éléments TUYAU, sont :

- SECTION : 'CERCLE'
  La section est définie par son rayon 'R' externe et son épaisseur 'EP', sur chaque maille puisque le maillage est représenté par la fibre moyenne du tuyau.
- TUYAU_NCOU : tncouch
  C'est le nombre de couches à utiliser pour l'intégration des relations de comportement non linéaires dans l'épaisseur des éléments de tuyau droit. En élasticité linéaire, une à deux couches suffisent, en non linéaire on conseille de mettre entre 3 et 5 couches. Le nombre de point de Gauss est égal à deux fois le nombre de couches plus un $(2\times tncouch+1)$, ce qui fait que le temps CPU augmente rapidement avec le nombre du couches.

- TUYAU_NSEC : tnsec
  C'est le nombre de secteurs angulaires à utiliser pour l'intégration des relations de comportement non linéaires dans la circonférence des éléments de tuyau droit. Par défaut le nombre de secteurs vaut 16. On conseille de mettre 32 secteurs en non linéaire pour des résultats précis (attention à l'augmentation du temps CPU avec le nombre de secteurs).

- ORIENTATION ('GENE_TUYAU')
  On définit à partir de l'un des nœuds extrémités de la ligne de tuyauterie une ligne continue tracée sur le tuyau. Les opérandes PRECISION et CRITERE permettent de définir la précision pour la construction de la génératrice et la limite entre un élément de tuyau droit et un élément courbe.

Remarque :
Le vecteur directeur de la ligne ainsi définie ne doit pas être colinéaire à la fibre moyenne du coude au nœud extrémité considéré, en utilisant le mot clé INFO=2 on peut vérifier si le vecteur défini est correct.

3.2.1 Opérande MODI_METRIQUE

L'opérande MODI_METRIQUE permet de définir pour les éléments TUYAU le type d'intégration dans l'épaisseur :
- MODI_METRIQUE = 'NON' conduit à assimiler dans les intégrations le rayon au rayon moyen. Ceci est donc valable pour les tuyaux de faible épaisseur (relativement au rayon),
- MODI_METRIQUE = 'OUI' implique une intégration complète, plus précise pour des tuyauteries épaisses, mais pouvant dans certains cas conduire à des oscillations de la solution.

3.2.2 Génératrice et notion de repère local : mot clé ORIENTATION

La génératrice tracée tout au long de la tuyauterie permet de définir l'origine des angles Φ [Figure 2.1.2-b]. Ceci est utilisé :
- pour interpréter les degrés de liberté d'ovalisation ;

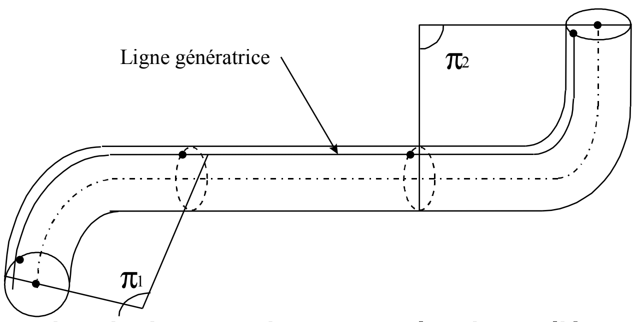


Figure Représentation de deux coudes non coplanaires reliés par un tuyau droit.

Pour une section transverse extrémité de la ligne de tuyauterie [Figure 3.2.2-b], l'utilisateur définit dans AFFE_CARA_ELEM sous le mot-clé ORIENTATION un vecteur dont la projection sur la section transverse extrémité définit un vecteur origine z_1 unitaire.

La syntaxe est la suivante :

```
AFFE_CARA_ELEM( ...
              ORIENTATION = _F( GROUP_NO = 'EXTREMITE',
                                CARA = 'GENE_TUYAU'
                                VALE = (x,y,z) ) )
```

où : EXTREMITE est le nœud centre de la section transverse extrémité.
(x, y, z) contient les 3 composantes du vecteur orientant la génératrice du tuyau, à projeter sur la section transverse extrémité. Ce vecteur doit être défini en un nœud ou un group_no

extrémité du tuyau. La géométrie est alors construite automatiquement pour tous les éléments connexes de TUYAU.
L'intersection entre la direction de ce vecteur et la surface moyenne du coude détermine la trace de la génératrice sur cette section. On appelle $x_{1,} y_{1,} z_1$ le trièdre direct associé à cette section où x_1 est le vecteur unitaire perpendiculaire à la section transverse. L'intersection entre la section transverse et la droite issue du centre de cette section dirigée par z_k est la trace d'une génératrice représentée ci-dessous. Pour l'ensemble des autres sections transverses, le trièdre x_k, y_k, z_k est obtenu soit par rotation du trièdre $x_{k-1}, y_{k-1}, z_{k-1}$ dans le cas des parties coudées, soit par translation du trièdre $x_{k-1}, y_{k-1}, z_{k-1}$ pour les parties droites de la tuyauterie.

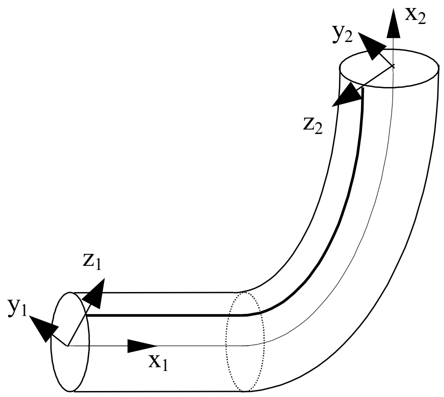


Figure : Représentation de la génératrice de référence.

L'origine des Φ commune à tous les éléments est définie par rapport à la trace de cette génératrice sur la section transverse. L'angle entre la trace de la génératrice et la position courante sur la section transverse est repérée par l'angle Φ. Le repère local du tuyau droit et coudé est ainsi défini par l'option ORIENTATION ('GENE_TUYAU') de la commande AFFE_CARA_ELEM qui permet de définir le premier vecteur z_k à une extrémité.

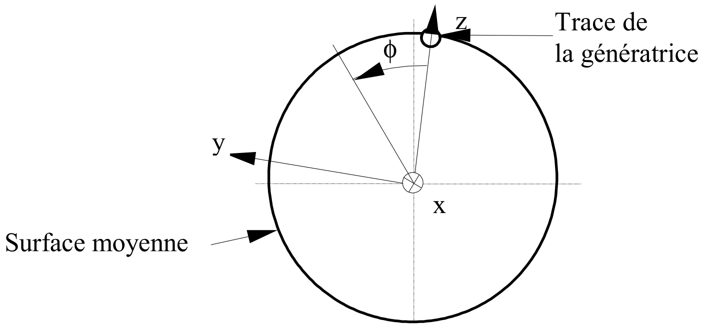
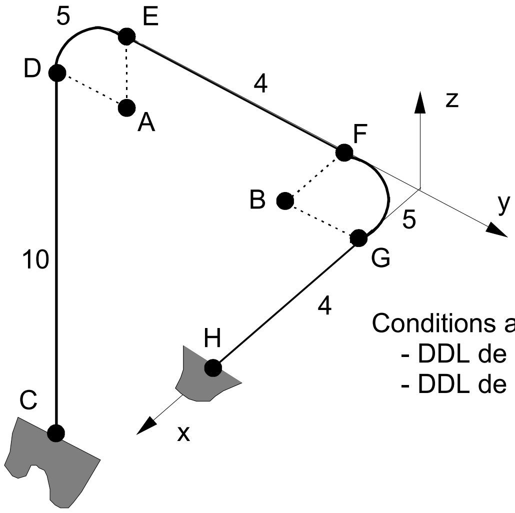


Figure : Repère local de l'élément XYZ .

3.2.3 Exemple d'affectation de caractéristique

Cet exemple est une tuyauterie comportant deux coudes (problème de Hoovgaard issu du test SSLL101C).



Modélisation TUYAU (SEG3)

Conditions aux limites : Points C et H
- DDL de Poutre : DX = DY = DZ = DRX = DRY = DRZ = 0
- DDL de Coque : UIm = VIm = WIm = 0 (m=2,3)
UOm = VOm = WOm = 0 (m=2,3)
WI1 = WO1 = WO = 0

- diamètre extérieur du tuyau : $0.185\,m$
- épaisseur du tuyau : $6.12\,m$
- rayon de courbure des coudes : $0.922\,m$

```
MODELE=AFFE_MODELE( MAILLAGE=MAILLAGE,
                    AFFE=_F( TOUT = 'OUI',
                             PHENOMENE = 'MECANIQUE',
                             MODELISATION = 'TUYAU_3M')
                  )

CARELEM=AFFE_CARA_ELEM( MODELE=MODELE,
                        POUTRE=_F( GROUP_MA = 'TOUT_ELT',
                                   SECTION  = 'CERCLE',
                                   CARA     = ('R', 'EP',),
                                   VALE     = (0.0925, 0.00612,)),
                        ORIENTATION=_F( GROUP_NO = 'C',
                                        CARA     = 'GENE_TUYAU',
                                        VALE     = (1., 0., 0.,))
                      )
```

3.3 Matériaux : DEFI_MATERIAU

La définition du comportement d'un matériau s'effectue à l'aide de l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01]. Il n'y a pas de contrainte particulière due à l'utilisation des éléments TUYAU.

Les matériaux utilisés avec l'ensemble des modélisations peuvent avoir des comportements élastiques en contraintes planes dont les caractéristiques linéaires sont constantes ou fonction de la température. Les comportements non linéaires en contraintes planes sont disponibles pour les modélisations tuyaux. Pour plus d'information sur ces non linéarités on peut se reporter au [§ 2.6].

DEFI_MATERIAU	TUYAU_3M	TUYAU_6M	Remarques
ELAS, ELAS_FO, ECRO_LINE, TRACTION, ...	•	•	tous les matériaux disponibles en C_PLAN

3.4 Chargements et conditions limites : AFFE_CHAR_MECA et AFFE_CHAR_MECA_F

On rappelle qu'il n'est pas possible d'effectuer des calculs thermiques, cependant l'affectation de température est possible, à l'aide de l'opérateur CREA_CHAMP. (voir paragraphe [§3.4.4]).

L'affectation des chargements et des conditions aux limites sur un modèle mécanique s'effectue à l'aide de l'opérateur AFFE_CHAR_MECA, si les chargements et les conditions aux limites mécaniques sur un système sont des valeurs réelles ne dépendant d'aucun paramètre, ou bien AFFE_CHAR_MECA_F, si ces valeurs sont fonctions de la position ou de l'incrément de chargement.

La documentation d'utilisation d'AFFE_CHAR_MECA et AFFE_CHAR_MECA_F est [U4.44.01].

3.4.1 Liste des mot-clés facteurs d'AFFE_CHAR_MECA et AFFE_CHAR_MECA_F

Les mot-clés facteurs disponibles pour ces deux opérateurs sont regroupés dans les deux tableaux suivants.

AFFE_CHAR_MECA	TUYAU_3M TUYAU_6M	But, remarques et exemples
DDL_IMPO	•	**But** : imposer, à des nœuds ou à des groupes de nœuds, une ou des valeurs de déplacement Mode 0 (gonflement) et : • modes 1 à 3 pour TUYAU_3M • modes 1 à 6 pour TUYAU_6M **Exemple** : SDLL14, SSLL101, SSLX102, SSNL106, …
LIAISON_DDL	•	**But** : définir une relation linéaire entre des degrés de liberté de deux ou plusieurs nœuds
LIAISON_OBLIQUE	•	**But** : appliquer, à des nœuds ou des groupes de nœuds, la même valeur de déplacement définie composante par composante dans un repère oblique quelconque
LIAISON_GROUP	•	**But** : définir des relations linéaires entre certains degrés de liberté de couples de nœuds, ces couples de nœuds étant obtenus en mettant en vis-à-vis deux listes de mailles ou de nœuds
LIAISON_UNIF	•	**But** : d'imposer une même valeur (inconnue) à des degrés de liberté d'un ensemble de nœuds **Exemple** : ELSA01B, ELSA01C et ELSA01D
LIAISON_SOLIDE	•	**But** : modéliser une partie indéformable d'une structure **Exemple** : ELSA01B, ELSA01C et ELSA01D
LIAISON_ELEM	•	**But** : modéliser les raccords d'une partie massive 3D avec une partie tuyau ou d'une partie coque avec une partie tuyau **Exemple** : SSLX101B, SSLX102A et SSLX102F
LIAISON_CHAMNO	•	**But** : définir une relation linéaire entre tous les ddls présents dans un concept CHAM_NO
PESANTEUR	•	**But** : appliquer un effet de pesanteur **Exemple** : SSLL101, SSLL106
FORCE_POUTRE	•	**But** : appliquer des forces linéiques, sur des éléments de type poutre **Exemple** : SSLL106
FORCE_NODALE	•	**But** : appliquer, à des nœuds ou des groupes de nœuds, des forces nodales, définies composante par composante dans le repère GLOBAL ou dans un repère oblique défini par 3 angles nautiques **Exemple** : SSLL106, …
FORCE_TUYAU	•	**But** : appliquer, à des éléments ou des groupes d'éléments de type tuyau une pression interne **Exemple** : SSLL106, SSNL117, SSNL503

AFFE_CHAR_MECA_F	TUYAU_3M TUYAU_6M	Remarques
DDL_IMPO	•	Voir ci-dessus
LIAISON_DDL	•	Voir ci-dessus
LIAISON_OBLIQUE	•	Voir ci-dessus
LIAISON_GROUP	•	Voir ci-dessus
LIAISON_UNIF	•	Voir ci-dessus
LIAISON_SOLIDE	•	Voir ci-dessus
FORCE_POUTRE	•	Voir ci-dessus
FORCE_NODALE	•	Voir ci-dessus
FORCE_TUYAU	•	Voir ci-dessus

3.4.2 Application d'une pression interne : mot-clé FORCE_TUYAU

Ce mot-clé facteur est utilisable pour appliquer une pression interne sur des éléments tuyau, définis par une ou plusieurs mailles ou des groupes de mailles. La pression est appliquée au niveau du rayon interne, comme en 3D.

La syntaxe pour appliquer ce chargement est rappelé ci-dessous :

```
•AFFE_CHAR_MECA (...
      |  FORCE_TUYAU =_F( ♦  /  TOUT      =  'OUI',
                             /  MAILLE    =  lma,               [l_maille]
                             /  GROUP_MA  =  lgma,              [l_gr_maille]
                          ♦  PRES         =  p,                 [R]
                        )

•AFFE_CHAR_MECA_F (...
      |  FORCE_TUYAU =_F( ♦  /  TOUT      =  'OUI',
                             /  MAILLE    =  lma,               [l_maille]
                             /  GROUP_MA  =  lgma,              [l_gr_maille]
                          ♦  PRES         =  pf,                [fonction]
                        )
```

L'opérande disponible est :

PRES = p (pf)

Valeur de la pression imposée (réel ou fonction du temps ou de la géométrie).

p est positif suivant le sens contraire de la normale à l'élément.

Ce chargement s'applique aux types de mailles et aux modélisations suivantes :

Maille	Modélisation
SEG3, SEG4	'TUYAU_3M'
SEG3	'TUYAU_6M'

Des exemples d'utilisation sont disponibles dans la base de tests : les cas-tests ELSA01B, SSLL106A, SSNL117A et SSNL503A.

3.4.3 Application d'une force répartie : mot-clé FORCE_POUTRE

Ce mot-clé facteur est utilisable pour appliquer des forces **linéiques**, constantes en fonction de x, sur des éléments de type poutre définis sur tout le maillage ou sur une ou plusieurs mailles ou des groupes de mailles. Les forces sont définies composante par composante, soit dans le repère GLOBAL, soit dans le repère local de l'élément défini par l'opérateur AFFE_CARA_ELEM [U4.42.01].

La syntaxe est disponible dans la documentation de AFFE_CHAR_MECA/AFFE_CHAR_MECA_F [U4.44.01]. Ce chargement s'applique aux types de mailles et aux modélisations suivantes :

Maille	Modélisation

SEG3, SEG4	TUYAU_3M
SEG3	TUYAU_6M

Un exemple d'utilisation est disponible dans la base de tests : le cas-test SSLL106.

3.4.4 Application de la pesanteur : mot-clé PESANTEUR (AFFE_CHAR_MECA seulement)

Ce mot-clé est utilisé pour appliqué l'effet de la pesanteur sur la tuyauterie.

AFFE_CHAR_MECA		**TUYAU_3M TUYAU_6M**	**Remarques**
PESANTEUR	(g, ap, bp, cp)	•	Accélération et direction de la pesanteur

Exemple d'utilisation de l'opérande PESANTEUR :

```
POI_PROP = AFFE_CHAR_MECA( MODELE=MODELE,
                           PESANTEUR=_F(GRAVITE=9.81,
                                        DIRECTION=(0.,0.,-1.),),
                         )
```

3.4.5 Raccords coques-tuyaux, 3D-tuyau et tuyaux-poutres : mot-clé LIAISON_ELEM

Il s'agit d'établir la liaison entre un nœud extrémité d'un élément de tuyau et un groupe de maille de bord d'éléments de coques ou d'éléments 3D. Ceci permet de mailler une partie de la tuyauterie (par exemple un coude) en coques ou éléments 3D et le reste en tuyaux droits. La formulation du raccord coques-tuyaux et du raccord 3D-Tuyau est présentée dans le document de référence [R3.08.06]. Ce raccord permet de transmettre le gauchissement et l'ovalisation moyens du maillage coque ou 3D aux degrés de liberté correspondant du tuyau.

Le raccord :

- **Coque-tuyau** : il permet de relier des éléments de bord (SEG2, SEG3) de la partie coque au nœud du tuyau à raccorder. Ce raccord est actuellement réalisable pour des tuyaux dont la fibre neutre est perpendiculaire aux normales aux facettes des plaques ou des coques. Le raccord est utilisable en utilisant le mot-clé LIAISON_ELEM = _F(OPTION = 'COQ_TUYAU') de AFFE_CHAR_MECA.
- **Tuyau-3D** : il permet de relier des éléments de bord (TRIA3, QUAD4, TRIA6,...) de la partie 3D au nœud du tuyau à raccorder. Le raccord est utilisable en utilisant le mot-clé LIAISON_ELEM = _F(OPTION = '3D_TUYAU') de AFFE_CHAR_MECA.

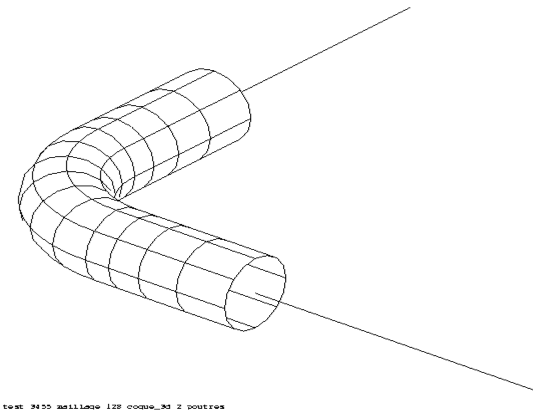


Figure 3.4.5-a Exemple de liaison entre un maillage COQUE_3D et TUYAU.

Les cas qui testent les raccords sont présentés sur le tableau suivant.

NOM	MODELISATION	ELEMENT	Remarques
SSLX101B Doc V : [V3.05.101]	DKT TUYAU DIS_TR	MEDKQU4 METUSEG3 POI1	Liaison COQ_TUYAU : Tuyau droit modélisé en coques et en poutres. Ce test a pour objectif de tester la liaison coque tuyau "COQ_TUYAU" en présence de chargements unitaires : traction, flexion et de torsion.
SSLX102A Doc V : [V3.05.102]	DKT TUYAU	MEDKQU4 METUSEG3 MEDKQU4 METUSEG3	Liaison COQ_TUYAU : Tuyauterie coudée en flexion.
SSLX102F Doc V : [V3.05.102]	3D TUYAU	HEXA20 METUSEG3	Liaison 3D_TUYAU : Tuyauterie coudée en flexion : modélisation 3D-TUYAU, relations linéaires 3D_TUYAU. Le coude est modélisé avec des éléments 3D.

Dans tous ces cas-tests, les résultats sont satisfaisants compte tenu qu'une partie des écarts constatés est imputables à la fusion du maillage 3D ou coques.

Remarque : *Raccords tuyaux-poutres.*

> Il s'agit d'établir une liaison entre un *nœud extrémité d'un élément de tuyau et un nœud extrémité d'un élément de poutre. La formulation tuyau comporte une cinématique de type poutre identique à la cinématique des éléments poutres. Il n'y a donc pas de coupure entre les déplacements de type poutre (3 déplacements et 3 rotations). La fibre moyenne de la poutre et du tuyau sont les mêmes. Par compte, la cinématique des éléments de poutre ne comprend pas de cinématique de coque (la section est indéformable) comme dans le cas des éléments tuyaux, il y a donc une coupure au niveau de la déformation de la section transverse.*
> *Il n'existe pas dans Code_Aster de raccord spécifique tuyau-poutre, la liaison entre ces deux éléments est assurée automatiquement, sans intervention de l'utilisateur, par le nœud commun à l'élément tuyau et à l'élément poutre. Néanmoins, certaines précautions sont à prendre, il faut que la transition entre les éléments de tuyau et poutre soit suffisamment éloignée de toutes zones "tuyau" ou la déformation de la section transverse est significative, c'est à dire qu'il ne faut raccorder que lorsque l'ovalisation est amortie.*

3.4.6 Conditions limites : mots-clés DDL_IMPO et LIAISON_*

Le mot-clé facteur DDL_IMPO permet d'imposer, à des nœuds introduits par un (au moins) des mots clés : TOUT, NOEUD, GROUP_NO, MAILLE, GROUP_MA, une ou plusieurs valeurs de déplacement (ou de certaines grandeurs associées). Suivant le nom de l'opérateur appelé, les valeurs sont fournies directement (AFFE_CHAR_MECA) ou par l'intermédiaire d'un concept fonction (AFFE_CHAR_MECA_F).

Les opérandes disponibles pour DDL_IMPO, sont listés ci-dessous :
- DX DY DZ : Blocage sur la composante de déplacement en **translation**
- DRX DRY DRZ : Blocage sur la composante de déplacement en **rotation**

Si les nœuds spécifiés appartiennent à des éléments 'TUYAU_3M' (ces éléments ont 15 degrés de liberté de coque) :

U : gauchissement — V, W : ovalisation
I : "in plane" — O : "out of plane"

Soit :
- UI2 VI2 WI2 UO2 VO2 WO2 : degrés de liberté liés au mode 2.
- UI3 VI3 WI3 UO3 VO3 WO3 : degrés de liberté liés au mode 3.
- WO WI1 WO1 : degrés de liberté de gonflement et mode 1 sur W .

Si les nœuds spécifiés appartiennent à des éléments 'TUYAU_6M' (ces éléments ont 33 degrés de liberté de coque), on ajoute les degrés de liberté suivants :

- UI4 VI4 WI4 UO4 VO4 WO4 : degrés de liberté liés au mode 4.
- UI5 VI5 WI5 UO5 VO5 WO5 : degrés de liberté liés au mode 5.
- UI6 VI6 WI6 UO6 VO6 WO6 : degrés de liberté liés au mode 6.

3.5 Application d'une dilatation thermique.

Aucun calcul thermique n'est disponible avec la modélisation TUYAU, il est néanmoins possible d'appliquer une dilatation (chargement d'origine thermique), sous la forme d'un champ de température aux nœuds, défini par les 3 composantes TEMP, TEMP_INF, TEMP_SUP, dont on déduit la température moyenne.

Ce champ aura été préalablement crée à l'aide de l'opérateur CREA_CHAMP (documentation [U4.72.04]).

CREA_CHAMP		**TUYAU_3M TUYAU_6M**	**Remarques**
TYPE_CHAM	'NOEU_TEMP_R' 'NOEU_TEMP_F'	•	Champ résultat de type température
OPERATION			
MAILLAGE			
MODELE			
AFFE	TOUT : 'OUI' GROUP_MA MAILLE NOEUD GROUP_NO	•	Le champ est fabriqué par affectation de valeurs sur des nœuds ou des mailles
NOM_CMP	'TEMP'	•	Les noms des composantes que l'on veut affecter : température
	'TEMP_INF'	•	Température intérieure
	'TEMP_SUP'	•	Température extérieure

L'affectation de la dilatation thermique s'effectue à l'aide de l'opérateur AFFE_MATERIAU (documentation [U4.43.03]).

AFFE_MATERIAU		**TUYAU_3M TUYAU_6M**	**Remarques**
AFFE_VARC			
NOM_VARC	'TEMP'	•	Nom de la variable de commande
NOM_CHAM	'TEMP'	•	
EVOL	tempe	•	tempe est le champ ou l'évolution crée par CREA_CHAMP puis éventuellement par CREA_RESU.
VALE_REF			température de référence

Remarque :

> *Dans le cas où l'on veut appliquer une température définie par une fonction, on peut utiliser l'opérateur CREA_RESU(TYPE_RESU='EVOL_THER', …), document [U4.44.12] pour créer un concept de type EVOL_THER utilisable dans AFFE_MATERIAU.*
> *Des exemples d'utilisation sont disponibles dans la base de tests : les cas-tests ELSA01B, SSLL106A, SSNL117A et SSNL503A.*

L'exemple suivant est extrait du cas-test SSLL101C.

```
T EMP = CREA_CHAMP(
   MAILLAGE = MAILLAGE ,
   TYPE_CHAM = 'NOEU_TEMP_R' ,
   OPERATION = 'AFFE' ,
   AFFE= (
      _F( TOUT = 'OUI' , NOM_CMP = 'TEMP' , VALE = 472.22 ) ,
```

```
        ) ,
)
TEMPER = CREA_RESU(
    OPERATION= 'AFFE' , TYPE_RESU= 'EVOL_THER' ,
    NOM_CHAM= 'TEMP' ,
    AFFE= _F( INST = 0.0 , CHAM_GD = TEMP )
)
AFF_MAT1 = AFFE_MATERIAU(
    MAILLAGE = MAILLAGE ,
    AFFE= _F( TOUT = 'OUI' , MATER = MATER ) ,
    AFFE_VARC= _F( TOUT = 'OUI' , EVOL = TEMPER , NOM_VARC = 'TEMP' ,
                    NOM_CHAM = 'TEMP' , VALE_REF = 0.0 ) ,
)
```

4 Résolution

4.1 Calculs linéaires : MECA_STATIQUE et autres opérateurs linéaires

Les calculs linéaires s'effectuent en petites déformations. Plusieurs opérateurs de résolution linéaires sont disponibles :

- MECA_STATIQUE : résolution d'un problème de mécanique statique linéaire [U4.51.01],
- MACRO_ELAS_MULT : calcule des réponses statiques linéaires pour différents cas de charges ou modes de Fourier. [U4.51.02],
- MODE_ITER_SIMULT : calcul des valeurs et vecteurs propres par des méthodes de sous espaces. [U4.52.03],
- MODE_ITER_INV : calcul des valeurs et vecteurs propres par la méthode d'itérations inverses [U4.52.04],
- MODE_ITER_CYCL : calcul des modes propres d'une structure à symétrie cyclique [U4.52.05],
- DYNA_LINE_TRAN : calcul de la réponse dynamique transitoire à une excitation temporelle quelconque [U4.53.02].

Par défaut, les seuls champs calculés sont les champs de déplacement DEPL et de contrainte SIEF_ELGA. D'autres champs sont disponibles par l'opérande OPTION (voir les options disponibles dans le paragraphe [§5.2] portant sur l'utilisation de CALC_CHAMP).

4.2 Calculs non linéaires : STAT_NON_LINE et DYNA_NON_LINE

4.2.1 Comportements et hypothèses de déformations disponibles

Les informations suivantes sont extraites de la documentation d'utilisation de l'opérateur STAT_NON_LINE : [U4.51.03].

STAT_NON_LINE DYNA_NON_LINE			**TUYAU_3M** **TUYAU_6M**	
COMP_INCR	RELATION		•	tous les comportements disponibles en C_PLAN
	DEFORMATION	PETIT	•	

Les relations de comportement incrémentales (mot clé facteur COMP_INCR) suivant l'hypothèse de petits déplacements et petites déformations (mot clé DEFORMATION = 'PETIT') sont les seules relations de comportement non linéaires mécaniques disponibles pour la modélisation TUYAU. Ces relations de comportement relient les taux de déformation aux taux de contraintes. Les comportements non linéaires supportés sont ceux déjà existants en contraintes planes définies dans les opérateurs STAT_NON_LINE et DYNA_NON_LINE. De plus, avec la méthode de De Borst [R5.03.03], tous les comportements 2D (D_PLAN, AXIS) en petites déformations sont utilisables.

Le concept RESULTAT de STAT_NON_LINE contient des champs de contraintes, de déplacement et de variables internes aux points d'intégration toujours calculées aux points de gauss :

- SIEF_ELGA : Tenseur des contraintes par élément aux points d'intégration dans le repère local de l'élément,
- VARI_ELGA : Champ de variables internes par élément aux points d'intégration dans le repère local de l'élément,
- DEPL : champs de déplacements.

De plus, un appel à l'opérateur CALC_CHAMP, permet d'accéder à d'autres champs. Notamment, on peut effectuer le passage des contraintes et variables internes des points de Gauss aux nœuds pour former les champs SIEF_ELNO et VARI_ELNO (voir le paragraphe [§5.2]).

Un champ VARI_… peut avoir plusieurs types de composantes. Par exemple, les composantes du champ VARI_ELNO sont, pour les éléments TUYAU :

K fois : $(V1, V2, \ldots.. Vn)$

Où : K est le nombre de points d'intégration total $K=(2\times NCOU+1)\times(2\times NSEC+1)$
N est le nombre de variables internes et dépend du comportement.

4.2.2 Détails sur les points d'intégration

Pour les calculs linéaires et non-linéaires, l'intégration numérique est réalisée avec une méthode de :

- Gauss le long de la fibre moyenne.
  Le nombre de points d'intégration est fixé à 3. Pour une maille dont les sommets sont 1 et 2 et numérotée de 1 à 2, les 3 points de gauss sont tels que le premier est proche de 1, le second est à égale distance de 1 et 2 et le troisième est plus proche de 2. Il faut donc faire attention à l'orientation des mailles lorsque l'on regarde les résultats aux points de gauss 1 et 3. En effet si l'on change l'orientation de la maille et qu'on la numérote de 2 à 1, le premier point de gauss est plus proche de 2.
- Simpson dans l'épaisseur et sur la circonférence :
  - L'intégration dans l'épaisseur est une intégration de Simpson à 3 points par couche. Le nombre de points d'intégration par couche est fixé à 3, au milieu de la couche, en peau supérieure et en peau inférieure de la couche, les deux points extrémités étant communs avec les couches voisines.
  - L'intégration suivant la circonférence est une intégration de Simpson par secteur, chaque secteur étant d'angle $2\pi/NSEC$. Φ est l'angle entre la génératrice et le centre du secteur. Le nombre de points d'intégration par secteur est fixé à 3, au milieu du secteur, en partie supérieure ($\Phi+2\pi/NSEC$) et inférieure ($\Phi-2\pi/NSEC$) du secteur, les deux points extrémités étant communs avec les secteurs voisins.

Le nombre de couches et le nombre de secteurs doit être défini par l'utilisateur à partir des mots clés : TUYAU_NCOU, TUYAU_NSEC de l'opérateur AFFE_CARA_ELEM.
Par exemple, avec 3 couches et 16 secteurs, le nombre de points d'intégration par élément est $(2\times NCOU+1)\times(2\times NSEC+1)\times NPG$ ce qui donne 693 points d'intégration. Pour chaque point de gauss sur la longueur de l'élément, on stocke les informations sur les couches et pour chaque couche sur tous les secteurs. Si on veut des informations au point de gauss NG , sur la couche NC niveau NCN ($NCN=-1$ si inférieur, $NCN=0$ si milieu, $NCN=+1$ si supérieur), sur le secteur NS , niveau NSN ($NSN=-1$ si inférieur, $NSN=0$ si milieu, $NSN=+1$ si supérieur), alors on regarde les valeurs recherchées au point d'intégration :

$$\begin{aligned} NP= \quad & (NG-1)\times(2\,NCOU+1)\times(2\,NSEC+1) \\ & +(2\times NC+NCN-1)\times(2\,NSEC+1)+(2\times NS+NSN) \end{aligned}.$$

4.3 Calculs dynamiques

Concernant les calculs dynamiques, aucune spécificité due à l'élément fini TUYAU existe.

5 Calculs supplémentaires et post-traitements

5.1 Calculs de matrices élémentaires : opérateur CALC_MATR_ELEM

L'opérateur CALC_MATR_ELEM (documentation [U4.61.01]) permet de calculer des matrices élémentaires assemblées par la commande ASSE_MATRICE (documentation [U4.61.22]).

Les seules matrices calculables avec les éléments tuyau sont les matrices de rigidité et de masse des éléments du modèle :

CALC_MATR_ELEM	**TUYAU_3M**	**TUYAU_6M**	**Remarques**
' RIGI_MECA'	•	•	
'MASS_MECA'	•	•	

Ces calculs de matrices élémentaires sont par exemple utilisés pour la détermination des fréquences propres d'un anneau cylindrique épais, dans le cas-test SDLS109G.

5.2 Calculs par éléments : opérateur CALC_CHAMP

L'opérateur CALC_CHAMP (documentation [U4.81.04]) effectue le calcul des champs aux éléments :
- contraintes, déformations, variables internes aux nœuds ;
- valeurs équivalentes (non disponible pour la modélisation TUYAU).

On présente ci-après les options de post-traitement pour les éléments de tuyaux. Pour les structures modélisées par éléments de tuyaux, il est particulièrement important de savoir comment sont présentés les résultats des contraintes : l'approche adoptée dans le *Code_Aster* consiste à observer les contraintes dans un repère particulier lié à l'élément dont l'axe de référence a été défini au paragraphe [§3.2.2]. Cette approche semble la plus physique car, pour une structure cylindrique, les contraintes les plus faciles à interpréter ne sont pas les contraintes en repère cartésien mais les contraintes en coordonnées cylindriques. En outre cette approche permet une plus grande souplesse d'utilisation.

CALC_CHAMP	**TUYAU_3M**	**TUYAU_6M**	**Remarques**
'SIEF_ELGA'	•	•	
'SIEF_ELNO'	•	•	
'SIGM_ELGA'	•	•	
'SIGM_ELNO'	•	•	
'EFGE_ELGA'	•	•	
'EFGE_ELNO'	•	•	
'EPSI_ELGA'	•	•	
'EPSI_ELNO'	•	•	
'VARI_ELNO'	•	•	

- SIEF_ELGA : calcul des contraintes par élément aux points d'intégration de l'élément à partir des déplacements (Utilisation uniquement en élasticité), dans le repère local de l'élément.
- SIEF_ELNO : calcul des contraintes par élément aux noeuds de l'élément à partir des contrainte aux points de Gauss, dans le repère local de l'élément.
- SIGM_ELGA : calcul des contraintes par élément aux points d'intégration de l'élément à partir de SIEF_ELGA dans le repère local de l'élément.
- SIGM_ELNO : calcul des contraintes par élément aux noeuds de l'élément à partir de SIGM_ELNO, dans le repère local de l'élément.
- EFGE_ELGA : calcul des efforts généralisés par élément aux points de Gauss à partir des déplacements, par intégration à partir de SIEF_ELGA, dans le repère local de l'élément.
- EFGE_ELNO : calcul des efforts généralisés par élément aux nœuds à partir des déplacements en linéaire et calculé par intégration à partir de SIEF_ELGA en non-linéaire, dans le repère local de l'élément.
- EPSI_ELGA : calcul des déformations par élément aux points d'intégration de l'élément à partir des déplacements, dans le repère local à l'élément (petites déformations).

- EPSI_ELNO : calcul des déformations par élément aux noeuds de l'élément à partir des déformations aux points de Gauss, dans le repère local à l'élément (petites déformations).
- VARI_ELNO : calcul du champ de variables internes par élément aux nœuds à partir des points de Gauss, pour toutes les couches (dans l'épaisseur SUP/MOY/INF) et pour tous les secteurs dans le repère local de l'élément.
-

On obtient alors par nœud de chaque élément un seul tenseur de contraintes (ou un seul ensemble de variables internes), ce qui permet le dépouillement graphique (évolution d'une composante, …).

5.3 Calculs aux noeuds : opérateur CALC_CHAMP

CALC_CHAMP	**TUYAU_3M**	**TUYAU_6M**	**Remarques**
'FORC_NODA'	•	•	
'REAC_NODA'	•	•	
'EFGE_NOEU'	•	•	
'SIEF_NOEU'	•	•	
'SIGM_NOEU'	•	•	
'VARI_NOEU'	•	•	

L'opérateur CALC_CHAMP (documentation [U4.81.04]) effectue le calcul des champs aux nœuds par moyenne et le calcul des forces et réactions :

- champs aux nœuds : contraintes, déformations, variables internes, valeurs équivalentes ;
  - Nom d'option : remplacer _ELNO_ par _NOEU_
  - On peut calculer les champs aux nœuds par CALC_CHAMP
    SIEF_NOEU , VARI_NOEU

- forces et réactions :
  - à partir des contraintes, l'équilibre : FORC_NODA (calcul des forces nodales à partir des contraintes aux points d'intégration, élément par élément),
  - puis en enlevant le chargement appliqué : REAC_NODA (calcul des forces nodales de réaction aux nœuds, à partir des contraintes aux points d'intégration, élément par élément) :
    REAC_NODA = FORC_NODA - chargements appliqués,
  - utiles pour vérification du chargement et pour calculs de résultantes, moments, etc.

5.4 Calculs de quantités sur tout ou partie de la structure : opérateur POST_ELEM

L'opérateur POST_ELEM (documentation [U4.81.22]) permet de calculer des quantités sur tout ou partie de la structure. Les quantités calculées correspondent à des options de calcul particulières de la modélisation affectée.

	TUYAU_3M	**TUYAU_6M**	**Remarques**
'MASS_INER'	•	•	

Pour les modélisation TUYAU, la seule option disponible actuellement est le calcul, sur chaque élément, de la masse, des inerties et de la position du centre de gravité (option 'MASS_INER').

5.5 Valeurs de composantes de champs de grandeurs : opérateur POST_RELEVE_T

Pour les modélisation TUYAU, l'opérateur POST_RELEVE_T (documentation [U4.81.21]) peut être utilisé pour, sur une ligne, extraire des valeurs (par exemple SIEF_ELNO). Le concept produit est de type table.

Remarque importante :

> *Si on vient d'une interface avec un mailleur (`PRE_GIBI` , `PRE_IDEAS` , `PRE_GMSH`), les nœuds d'un `groupno` sont rangés par ordre numérique. Il faut réordonner les nœuds le long de la ligne de dépouillement. La solution est d'utiliser l'opérateur `DEFI_GROUP` avec l'option `NOEU_ORDO` . Cette option permet de créer un `GROUP_NO` ordonné contenant les nœuds d'un ensemble de mailles formés de segments (`SEG2` , `SEG3` ou `SEG4`).*

Un exemple d'extraction de composante est donné dans le cas-test SSNL503 (voir la description au paragraphe [§6.2]) :

```
TAB_DRZ=POST_RELEVE_T( ACTION=_F(
                       GROUP_NO = 'D',
                       INTITULE = 'TB_DRZ',
                       RESULTAT = RESUL,
                       NOM_CHAM = 'DEPL',
                       NOM_CMP = 'DRZ',
                       TOUT_ORDRE = 'OUI',
                       OPERATION = 'EXTRACTION'
                       )
                )
```

Cette syntaxe a pour but :

- d'extraire : `OPERATION = 'EXTRACTION'`
- sur la ligne (le groupe de nœuds) `D` : `GROUP_NO = 'D'`
- la composante `DRZ` du déplacement : `NOM_CHAM = 'DEPL', NOM_CMP = 'DRZ',`
- pour tous les instants de calcul : `TOUT_ORDRE = 'OUI'`

5.6 Impression des résultats : opérateur `IMPR_RESU`

L'opérateur `IMPR_RESU` permet d'écrire le maillage et/ou les résultats d'un calcul sur listing au format `'RESULTAT'` ou sur un fichier dans un format visualisable par des outils de post-traitement externes à Aster : format `RESULTAT` et `ASTER` (documentation [U4.91.01]), format `CASTEM` (documentation [U7.05.11]), format `ENSIGHT` documentation [U7.05.31]), format `IDEAS` (documentation [U7.05.01]), format `MED` (documentation [U7.05.21]) ou format `GMSH` (documentation [Ux.xx.xx]).

Actuellement cette procédure permet d'écrire au choix :

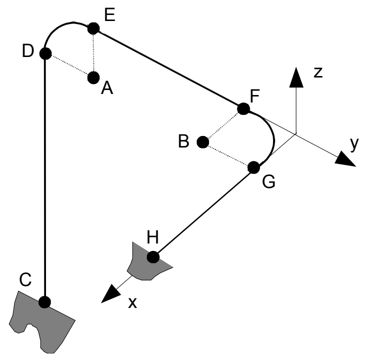
- un maillage,
- des champs aux nœuds (de déplacements, de températures, de modes propres, de modes statiques, …),
- des champs par éléments aux nœuds ou aux points de GAUSS (de contraintes, d'efforts généralisés, de variables internes…).

L'élément `TUYAU` étant traité de la même manière que les autres éléments finis, nous renvoyons le lecteur aux notes d'utilisation correspondant au format de sortie qu'il souhaite utiliser.

6 Exemples

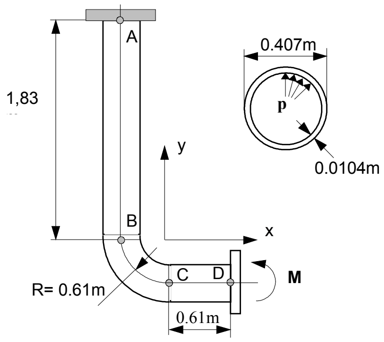
Les tableaux suivant décrivent quelques cas-tests utilisant l'élément TUYAU.

6.1 Analyse statique linéaire

SSLL101  	**Titre :** Problème de Hovgaard. Analyse statique d'une tuyauterie tridimensionnelle comportant des coudes **Documentation V :** [V3.01.101] **Modélisations :** SSLL101D TUYAU_6M SEG3 SSLL101C TUYAU_3M SEG3 SSLL101E TUYAU_3M SEG4
SSLL106	**Titre :** Tube droit soumis à plusieurs chargements. **Documentation V :** [V3.01.106] **Modélisations :** SSLL106B TUYAU_3M SEG3 SSLL106E TUYAU_3M SEG4 SSLL106D TUYAU_6M SEG3 **Chargements** : une traction, 2 efforts tranchants, 2 moments de flexion , une torsion et une pression. Il permet de tester les déplacements, les efforts aux nœuds et les contraintes et déformations aux points de Gauss, par rapport à une solution de référence analytique. Le maillage utilisé est le même pour les quatre modélisations. Les modélisations A et C utilisent MECA_STATIQUE, tandis que les modélisations B et D utilisent STAT_NON_LINE pour la résolution.
SSLX102	**Titre :** Tuyauterie coudée en flexion. **Documentation V :** [V3.05.102] **Modélisations :** SSLX102B TUYAU_3M SEG3 SSLX102C TUYAU_6M SEG3

6.2 Analyse statique non linéaire matériau

SSNL503



Titre : Ruine élasto-plastique d'un tuyau coudé mince.

Documentation V : [V2.05.002]

Modélisations :

SSNL503A	TUYAU_3M	SEG3

Chargement : tuyau coudé mince soumis à une flexion dans son plan et a une pression interne avec effet de fond.

SSNI106

Titre : Poutre encastrée a une extrémité et chargée par une traction avec écrouissage linéaire ou un moment en plasticité parfaite.

Documentation V : [x]

Modélisations :

SSNL106E	TUYAU_3M	SEG3
SSNL106F	TUYAU_3M	SEG4
SSNL106G	TUYAU_6M	SEG3

Chargements : une traction, 2 efforts tranchants, 2 moments de flexion , une torsion et une pression. Les modélisations A et C utilisent `MECA_STATIQUE`, tandis que les modélisations B et D utilisent `STAT_NON_LINE` pour la résolution.

HSNV100

Titre : Thermo-plasticité en traction simple d'un tuyau.

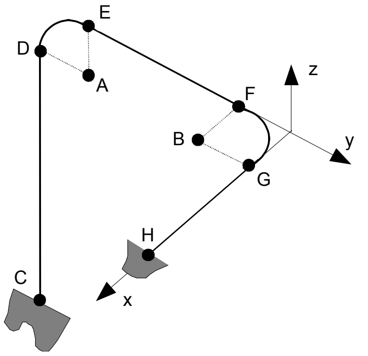
Documentation V : [V7.22.100]

Modélisations :

HSNV100C	TUYAU_3M	SEG3
HSNV100D	TUYAU_6M	SEG3

6.3 Analyse modale en dynamique

SDLX02



Titre ::Problème de Hovgaard. Analyse dynamique d'une tuyauterie tridimensionnelle comportant des coudes.

Documentation V : [V2.05.002]

Modélisations :

SDLX02D	TUYAU_3M	SEG3
SDLX02F	TUYAU_3M	SEG4
SDLX02E	TUYAU_6M	SEG3

SDLL14

Titre : Mode de vibration d'un coude de tuyauterie mince.

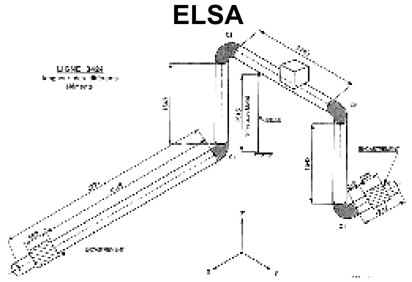
Documentation V : [V2.02.014]

Modélisations :

SDLL14A	TUYAU_3M	SEG3
SDLL14C	TUYAU_3M	SEG4
SDLL14B	TUYAU_6M	SEG3

6.4 Analyse dynamique non linéaire

ELSA



Titre : Analyse sismique non linéaire d'une ligne de tuyauterie.

Documentation V : [V1.10.119]

Modélisations :

ELSA01B	TUYAU_3M	SEG3
ELSA01C	TUYAU_3M	SEG4

Chargements : une excitation sismique est imposée à la ligne. Celle-ci entraîne une plastification partielle (1%) des coudes uniquement.

7 Références bibliographiques

1. Éléments finis de tuyau droit et courbe avec ovalisation, gonflement et gauchissement en élasto-plasticité, Documentation *Code_Aster*, Manuel de Référence [R3.08.06]

2. Modélisations TUYAU et TUYAU_6M, Documentation *Code_Aster*, Manuel d'Utilisation [U3.11.06]

3. ELSA01 : Analyse sismique non linéaire de tuyauterie, Documentation *Code_Aster*, Manuel de Validation [V1.10.119]

4. P. MASSIN, J.M. PROIX, F. WAECKEL, E. CHAMPAIN : Modélisation du comportement non-linéaire matériel des tuyauteries droites et coudées en statique et en dynamique, Note HI-74/99/013/A, EDF/MTI, 1999.

5. E. CHAMPAIN, Projet CACIP : Validation des développements relatifs à la prise en compte de la plasticité dans les éléments de tuyauteries, HP-52/99*029/B, EDF/AMV, 2000.